Journal of Agricultural Machinery

Homepage: https://jame.um.ac.ir

Research Article
Vol. 14, No. 3, 2024, p. 235-252

Evaluation of Dielectric Spectroscopy in Fusion with Vis-SWNIR Spectroscopy for the Measurement of Sugar Concentration in Sugarcane Stalk Samples

M. Naderi-Boldaji[1*], M. Tohidi[2], M. Ghasemi-Varnamkhasti[1]

1- Associate Professors, Department of Mechanical Engineering of Biosystems, Shahrekord University, Shahrekord, Iran
2- Graduated PhD Student, Department of Mechanical Engineering of Biosystems, Shahrekord University, Shahrekord, Iran
(*- Corresponding Author Email: naderi.mojtaba@sku.ac.ir)

Received: 15 January 2023
Revised: 04 March 2023
Accepted: 18 March 2023
Available Online: 31 August 2024

How to cite this article:
Naderi-Boldaji, M., Tohidi, M., & Ghasemi-Varnamkhasti, M. (2024). Evaluation of Dielectric Spectroscopy in Fusion with Vis-SWNIR Spectroscopy for the Measurement of Sugar Concentration in Sugarcane Stalk Samples. *Journal of Agricultural Machinery, 14*(3), 235-252. (in Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jam.2023.80620.1144

Introduction

The development of portable devices for real-time quality assessment of sugarcane is an essential necessity in the agricultural and industrial technology of sugarcane production and processing. Attributes of sugarcane such as sugar concentration and water content can be utilized for this purpose. Near infrared (NIR) spectroscopy has been one of the most widely applied techniques for quality evaluation of sugarcane. However, NIR spectrophotometers in the full NIR wavelength range (up to 2500 nm) are expensive devices that are not readily available for portable applications. Short-wave NIR devices in the range of 1100 nm are available at lower costs but need to be evaluated for specific applications. On the other hand, dielectric spectroscopy has attracted the attention of researchers for quality evaluation of agricultural and food products. In a previous study, a parallel-plate capacitance sensor was developed and evaluated for non-destructive measurement of sugarcane Brix (total soluble solids) and Pol (sucrose concentration) as well as water content, in the frequency range of 0-10 MHz. The results showed excellent prediction models with root mean square errors smaller than 0.3 for Brix and Pol. This study aimed to develop and evaluate a dielectric sensor that can be extended for portable measurements on standing sugarcane stalk in comparison with short-wave NIR (SWNIR) spectroscopy to address how the fusion of the two methods may improve the accuracy of models for predicting sugarcane Brix.

Materials and Methods

A dielectric sensor in the form of a gadget was developed with metallic electrodes to encompass the sugarcane stalk samples. The dielectric sensor was excited with a sinusoidal voltage within 0-150 MHz frequency range by a function generator, and the conductive power through the electrodes was measured using a spectrum analyzer. 105 sugarcane stalk samples were prepared from seven sugarcane varieties and scanned with the dielectric sensor. The samples were also subjected to Vis-SWNIR radiation in the wavelength range of 400-1100 nm, and the reflectance spectra were captured. Reference Brix and water content of the samples were determined using a portable refractometer and oven-drying method, respectively. Regression analyses and artificial neural networks were performed on independent and combined data from dielectric and Vis-SWNIR spectroscopy to develop prediction models for Brix and water content.

Results and Discussion

Partial least squares regression on independent data sets of each instrument resulted in $RMSE_P$ = 1.14 and



https://doi.org/10.22067/jam.2023.80620.1144

$RMSE_P$ = 1.88 for Brix using Vis-SWNIR and dielectric spectroscopy, respectively. Moreover, data fusion of dielectric and Vis-SWNIR spectroscopy at a low level for the prediction of Brix significantly improved the prediction accuracy to R^2_P = 0.94 and $RMSE_P$= 0.74. The medium-level data fusion resulted in R^2_P = 0.89 and $RMSE_P$ = 0.93 for prediction of water content.

Conclusion

In this study, the accuracy of using Vis-SWNIR and dielectric spectroscopy data for predicting Brix and water content in sugarcane stalk samples was evaluated. To develop the prediction models, partial least squares (PLS) regression and artificial neural network (ANN) were compared. First, the prediction models were developed based on Vis-SWNIR and dielectric spectroscopy independently. Then, the two techniques were fused and the improvement in the prediction accuracy was investigated. Fusing the two methods at an intermediate level lowered the RMSE of Brix to 0.74, showing noticeable improvement compared to previous studies. Based on the achieved results, developing a fusion probe for SWNIR and dielectric spectroscopy and designing the measuring system could be the aim of future studies for in-situ evaluation of sugarcane quality parameters. Due to the importance of sugarcane quality evaluation, during growth and maturity, the results of this study can have a significant role in the development of a portable device that combines NIR and dielectric spectroscopy methods for fast and non-destructive evaluation of sugarcane quality parameters.

Acknowledgement

This article was extracted from a research project financially supported by the Research deputy of Shahrekord University. The grant number was 0GRD34M1614. The authors would like to appreciate the support of the Amir-Kabir Sugarcane Agro-Industry Co., Khuzestan, Iran for providing the sugarcane stalk samples.

Keywords: Brix, Data fusion, Dielectric spectroscopy, Sugarcane, Visible-Near infrared spectroscopy

نشریه ماشین‌های کشاورزی
https://jame.um.ac.ir

مقاله پژوهشی
جلد ۱۴، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۳، ص ۲۵۲-۲۳۵

ارزیابی روش طیف‌سنجی دی‌الکتریک در تلفیق با روش طیف‌سنجی Vis-SWNIR برای اندازه‌گیری غلظت قند روی نمونه ساقه نیشکر

مجتبی نادری بلداجی[1*]، مجتبی توحیدی[2]، مهدی قاسمی ورنامخواستی[1]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۲۵
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۲۷

چکیده

توسعه ابزارهای اندازه‌گیری سریع برای ارزیابی خصوصیات کیفی نیشکر شامل غلظت قند و محتوای رطوبت بدون نیاز به استخراج عصاره از ساقه از جمله ضرورت‌های فناوری در کشاورزی و صنعت این محصول می‌باشد. در این پژوهش، یک پراب دی‌الکتریک با قابلیت توسعه و به‌کارگیری به شکل قابل‌حمل توسعه داده شد و عملکرد آن برای اندازه‌گیری غلظت قند (بر حسب درجه بریکس) و محتوای رطوبت روی نمونه‌های ساقه از هفت رقم نیشکر در بازه فرکانسی MHz ۱۵۰-۰ مورد ارزیابی قرار گرفت. همچنین به‌منظور مقایسه و بهبود دقت اندازه‌گیری غلظت قند، توانایی روش طیف‌سنجی مرئی- فروسرخ نزدیک موج کوتاه (Vis-SWNIR) در محدوده طول موج ۱۱۰۰-۴۰۰ نانومتر بررسی شد. از مدل‌های رگرسیون حداقل مربعات جزئی (PLS) و شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN) برای پیش‌بینی درجه بریکس و محتوای رطوبت نمونه‌ها استفاده شد. علاوه‌بر ارزیابی مستقل عملکرد هر دو روش در بهترین حالت با $RMSE_P$= ۱/۱۴ و $RMSE_P$=۱/۸۸ برای اندازه‌گیری بریکس به‌ترتیب با روش‌های طیف‌سنجیVis-SWNIR و دی‌الکتریک، روش‌های تلفیق داده (سطح پایین و سطح متوسط) برای استفاده از اثر هم‌افزایی اطلاعات به‌دست‌آمده از دو روش به‌کار گرفته شد. در پیش‌بینی بریکس، بهترین نتیجه مربوط به روش تلفیق داده سطح پایین با ۰/۹۴= R^2_p و $RMSE_P$=۰/۷۴ بود. همچنین روش تلفیق داده سطح متوسط با ۰/۸۹= R^2_p و $RMSE_P$=۰/۹۳ بهترین نتیجه را در پیش‌گویی مقادیر محتوای رطوبت داشت. بنابراین، رویکرد تلفیق داده به‌طور موثر دقت پیش‌بینی مدل‌های توصیف‌کننده را بهبود بخشید و می‌تواند به‌عنوان روش و ابزاری قابل‌اعتماد در اندازه‌گیری خصوصیات کیفی نیشکر مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: تلفیق داده، درجه بریکس، طیف‌سنجی دی‌الکتریک، طیف‌سنجی مرئی- فروسرخ نزدیک، نیشکر

مقدمه

شکر یکی از مهم‌ترین مواد غذایی مورد نیاز انسان است که در بدن تولید انرژی می‌کند. تقریباً ۶۰ درصد قند تولیدی دنیا از نیشکر و مابقی از چغندرقند تهیه می‌شود. در بین ۱۱۸ کشور تولیدکننده شکر، تنها ۹ کشور از جمله ایران از نیشکر و چغندرقند، ۳۸ کشور به‌تنهایی از چغندرقند و ۷۱ کشور فقط از نیشکر، شکر تولید می‌کنند. لذا وابستگی جهانی در حدود ۷۵٪ به نیشکر و ۲۵٪ به چغندرقند است. نیشکر با پتانسیل تولید تا ۱۲۰ تن نی در هکتار و بیش از ۶۰ میلیون کیلوکالری تولید انرژی در هکتار، بخش عمده‌ای از انرژی غذای مردم جهان را تأمین می‌کند (FAO, 2021). اجزای تشکیل‌دهنده عصاره خام نیشکر بسته به رقم و اقلیم متغیر است و عموماً شامل ۷۵-۶۹ درصد آب، ۱۶-۸ درصد ساکاروز، ۲-۰/۵ درصد قندهای احیاکننده، ۵-۳ درصد فیبر، ۱-۰/۵ درصد ترکیبات غیرآلی، ۱-۰/۵ درصد مواد نیتروژن‌دار و ۱-۰/۵ درصد سایر مواد آلی است (Lal Mathur, 1990). این گیاه یکی از محصولات مهم زراعی کشور می‌باشد و در دهه اخیر به جایگاه مناسبی از نظر سطح زیر کشت و همچنین رشد عملکرد محصول دست یافته است، به گونه‌ای که در سال زراعی ۹۷-۹۶ سطح زیر کشت نیشکر در

۱- دانشیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران
۲- دانش‌آموخته دکتری، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران
(*- نویسنده مسئول: (Email: naderi.mojtaba@sku.ac.ir
https://doi.org/10.22067/jam.2023.80620.1144

کشور ۸۸/۳ هزار هکتار و میانگین عملکرد آن به حدود ۵۸ تن در هکتار رسید (Anonymous, 2018). استان خوزستان با سهم تولید ۹۷ درصد از کل نیشکر کشور به‌عنوان قطب تولید نیشکر ایران شاخته شده است. وجود ۱۲ واحد کشت و صنعت نیشکر در این استان تولید سالانه ۶۵۰ هزار تن شکر را رقم زده است.

امروزه اندازه‌گیری و پایش کیفیت علاوه بر کمیت محصولات کشاورزی از جمله چالش‌های علمی و فنی کشاورزی بوده و بیش از پیش مورد توجه محققین واقع شده است. به‌طور کلی، بسیاری از فن‌آوری‌های رایج در تعیین خصوصیات کیفی محصولات از جمله نیشکر برای استفاده سریع مناسب نیستند، چرا که اجرای آن‌ها نیاز به افراد با مهارت بالا و تجهیزات گران‌قیمت دارند. همچنین روش‌های آزمایشگاهی وقت‌گیر بوده، اغلب وابسته به کاربر هستند و شامل استفاده از مواد شیمیایی خطرناک می‌شوند. مهم‌تر از همه این‌که نیازمند مکان ثابتی می‌باشند و تنها در آزمایشگاه قابلیت اجرا دارند (Mehrotra, & Siesler, 2003). به‌عنوان مثال، روش آزمایشگاهی پلاریمتری برای اندازه‌گیری غلظت قند در نیشکر یا چغندرقند نیاز به آماده‌سازی نمونه‌های عصاره قبل از اندازه‌گیری ساکاروز دارد و اغلب با سطوح بالایی از آلودگی با موادی مانند استات سرب همراه است (Magalhaes & Cerri, 2007). در همه روش‌های مزرعه‌ای (به‌جز برخی روش‌های غیرمخرب در حال پژوهش) که تاکنون برای عیارسنجی نیشکر به‌کار گرفته شده‌اند، ابتدا لازم است که ساقه نیشکر له‌شده و از عصاره آن برای تعیین عیار قند استفاده شود. از طرفی ارزش‌گذاری اقتصادی نیشکر در ورودی کارخانه‌های قند براساس شاخص‌های کیفی نیشکر از جمله عیار (غلظت) قند صورت می‌گیرد که نیازمند توسعه ابزارهای اندازه‌گیری سریع با قابلیت اندازه‌گیری غیرمخرب بر روی ساقه بدین منظور است.

ازجمله روش‌های غیرمخرب استفاده‌شده به‌منظور ارزیابی کیفیت محصولات کشاورزی می‌توان به روش‌های طیف‌سنجی دی‌الکتریک، طیف‌سنجی فروسرخ نزدیک، طیف‌سنجی رامان، ماشین بینایی و روش‌های صوتی و فراصوتی اشاره نمود که هر یک برای اندازه‌گیری پارامتر کیفی خاصی به‌کار گرفته شده‌اند (Augusto & Filho, 2009; Cole, Eggleston, Gilbert, & Chung, 2016; Mireei, Bagheri, Sadeghi, & Shahraki, 2016; Naderi-Boldaji, Fazelian-Dehkordi, Mireei, & Ghasemi-Varnamkhasti, 2015; Nawi, Chen, Jensen, & Mehdizadeh, 2013; Nawi, Jensen, & Chen, 2012; Xiaobo, Jiewen, Xingyi, & Yanxiao, 2007). در میان روش‌های مذکور روش طیف‌سنجی مرئی- فروسرخ (Vis-NIR) به علت دقت بالا و امکان اندازه‌گیری همزمان خصوصیات کیفی ماده مورد توجه بیشتری قرار گرفته است (Pandiselvam *et al.*, 2022; Sirisomboon, 2018). در سال‌های اخیر پژوهش‌های زیادی با استفاده از این روش برای سنجش پارامترهای کیفی محصولات مختلف از جمله خرما (Mireei, Mohtasebi, Masoodi, Rafiei, & Arabanian, 2010)، سیب (Bobelyn *et al.*, 2010)، نیشکر (Chiatrakul, Terdwongworakul, Phuangsombut, & Phuangsombut, 2022; Nawi *et al.*, 2012; Nawi *et al.*, 2013)، پرتقال (Magwaza *et al.*, 2013)، لیموشیرین (Goodarzi, Movahhed, Shakouri, & Ahmadi Chenarbon, 2022)، چغندرقند (Bahrami, Honarvar, Ansari, & Jamshidi, 2022; Gaci *et al.*, 2022; Pan, Zhu, Lu, & McGrath, 2015) و گلابی (Choi, Chen, Lee, & Yim, 2017) انجام شده است. با این‌حال به‌کارگیری این روش در محدوده کامل طیف فروسرخ نزدیک (تا ۲۵۰۰ نانومتر) به دلیل هزینه بالای دستگاه طیف‌سنج و عدم سهولت دسترسی به آن موجب محدودیت‌هایی شده که توجه محققین را برای ارزیابی توانایی محدوده مرئی- نزدیک فروسرخ موج کوتاه (Vis-SWNIR[1] تا طول موج ۱۱۰۰ نانومتر) برای اندازه‌گیری خصوصیات کیفی مواد غذایی و کشاورزی به خود جلب نموده است چرا که طیف‌سنج‌های در این محدوده طیفی با قیمت نسبتا ارزان در داخل کشور نیز تولید می‌شوند.

همچنین در مطالعات متعددی کارایی روش طیف‌سنجی دی‌الکتریک برای سنجش کیفیت مواد غذایی و کشاورزی از جمله عصاره انگور (Garcia, Torres, De Blas, De Francisco, & Illanes, 2004)، خربزه (Guo, Nelson, Trabelsi, & Kays, 2007)، کیفیت گوشت (Aldeza, Botella, Toldr, & Fito, 2010)، محتوای قند در عسل (Guo, Zhu, Liu, & Zhuang, 2010)، رسیدگی موز (Soltani, Alimardani, & Omid, 2011)، نیشکر (Naderi-Boldaji *et al.*, 2015)، کیفیت روغن زیتون (Sanaeifar, Jafari, & Golmakani, 2018) و کیوی (Kamgar, Nassiri, Fazayeli, & Guardia, 2019) بررسی شده است. روش دی‌الکتریک یک روش ساده و ارزان قیمت با قابلیت اندازه‌گیری به شکل غیرمخرب می‌باشد که امکان توسعه و به‌کارگیری آن نسبت به روش NIR به‌مراتب آسان‌تر است. طیف‌سنجی دی‌الکتریک بیانگر سنجش روند تغییرات مشخصه‌های دی‌الکتریک ماده تابعی از فرکانس میدان الکتریکی حسگر است که به شکل طیف‌های دی‌الکتریک مورد تحلیل قرار می‌گیرد (Blakey & Morales-Partera, 2016; Nelson, 2004; Skierucha, Wilczek, & Szypowska, 2012). نادری بلداجی و همکاران (Naderi-Boldaji *et al.* 2015) با استفاده از روش طیف‌سنجی دی الکتریک و به‌کارگیری یک حسگر خازنی صفحه موازی امکان اندازه‌گیری محتوای قند ساقه چهار رقم مختلف نیشکر را بررسی کردند. نتایج حاکی از دقت بسیار مطلوب این روش برای اندازه‌گیری درجه بریکس، درجه پل (ساکاروز) و محتوای رطوبت ساقه به شکل

1- Visible-Short Wave Near-infrared

غیرمخرب بود. لذا توسعه یک پراب دی‌الکتریک با قابلیت توسعه و به‌کارگیری به شکل قابل‌حمل و امکان تغییر فاصله بین الکترودها جهت انطباق با ساقه ارقام مختلف نیشکر با قطرهای متفاوت و اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای مد نظر قرار گرفت.

تلفیق روش‌های اندازه‌گیری مختلف[1] می‌تواند در افزایش دقت اندازه‌گیری مشخصه‌های کیفی محصولات کشاورزی تاثیر به‌سزایی داشته باشد. به‌طور کلی تلفیق داده‌های دو یا چند حسگر به‌خصوص زمانی‌که حسگرها اثرات متقابل متفاوتی با ماده ایجاد نمایند می‌توانند نسبت به حالت استفاده از یک حسگر، اطلاعات دقیق‌تری از ماده فراهم کرده و منجر به نتایج بهتری شود (Korel, Luzuriaga, & Balaban, 2001). تاکنون تحقیقی در زمینه‌ی استفاده تلفیقی از دو روش طیف‌سنجی دی‌الکتریک و طیف‌سنجی Vis-SWNIR برای اندازه‌گیری محتوای قند ساقه نیشکر بدون استخراج عصاره از ساقه گزارش نشده است. اندازه‌گیری با حسگر دی‌الکتریک بر پایه اثر متقابل یک میدان الکتریکی با ماده و با روش طیف‌سنجی فروسرخ بر پایه جذب انرژی از طیف الکترومغناطیس می‌باشد. لذا انتظار می‌رود تلفیق دو روش بتواند اطلاعات مکملی از دو اثر متقابل با ماده را در اندازه‌گیری دقیق‌تر مشخصات کیفی نیشکر ایجاد نماید. بنابراین اهداف این پژوهش عبارتند از: ۱- توسعه و ارزیابی یک حسگر دی‌الکتریک با قابلیت توسعه و به‌کارگیری برای اندازه‌گیری مزرعه‌ای ساقه نیشکر به شکل غیرمخرب، ۲- ارزیابی روش طیف‌سنجی Vis-SWNIR در اندازه‌گیری مشخصه‌های کیفی ساقه نیشکر و ۳- ارزیابی تلفیق دو روش غیرمخرب طیف‌سنجی دی‌الکتریک و طیف‌سنجی Vis/WSIR در بهبود دقت اندازه‌گیری غلظت قند و محتوای رطوبت ساقه.

مواد و روش‌ها

تهیه نمونه‌ها

در این مطالعه، نمونه‌های نیشکر رسیده در اواخر فصل پاییز از مزارع نیشکر واحد کشت و صنعت امیرکبیر استان خوزستان تهیه شد. نمونه‌ها از هفت رقم تجاری CP-48، CP-57، CP-69، CP-70، CP-73، IRC-9902 و IRC-9903 انتخاب شدند. به‌منظور پوشش گستره‌ای از تغییرات غلظت قند، نمونه‌ها به‌صورت تصادفی از نقاط مختلف چند مزرعه تهیه و در کوتاه‌ترین زمان ممکن به محل اندازه‌گیری در دانشگاه شهرکرد منتقل شدند. نمونه‌ها تا زمان اندازه‌گیری برای جلوگیری از فساد و از دست دادن رطوبت در یخچال با دمای ۴ درجه سلسیوس نگهداری شدند. پیش از شروع اندازه‌گیری برای هر رقم، به‌منظور برقراری شرایط تعادل دمایی، نمونه‌ها به مدت ۱۲ ساعت در محل آزمایش نگهداری شد تا به دمای محیط برسند. برای انجام آزمایش‌ها از قسمت میانی بین گره‌های روی ساقه، تعداد ۱۰۵ نمونه ۱۰ سانتی‌متری از ارقام مختلف تهیه شد. هر نمونه به دو قطعه ۵ سانتی‌متری جفت‌شده بریده شد که نیمی از آن برای اندازه‌گیری با حسگرها و سپس خشکاندن در آون برای اندازه‌گیری محتوای رطوبت و نیم جفت‌شده برای اندازه‌گیری مرجع غلظت قند مورد استفاده قرار گرفت. با توجه به تغییرات شدید غلظت قند در امتداد طول ساقه نیشکر، به‌منظور افزایش گستره تغییرات محتوای قند، نمونه‌ها از قسمت‌های مختلف سر، وسط و پایین ساقه تهیه شدند. قطر نمونه‌ها توسط کولیس با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر و جرم مرطوب آن‌ها توسط ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۱ گرم اندازه‌گیری و ثبت گردید.

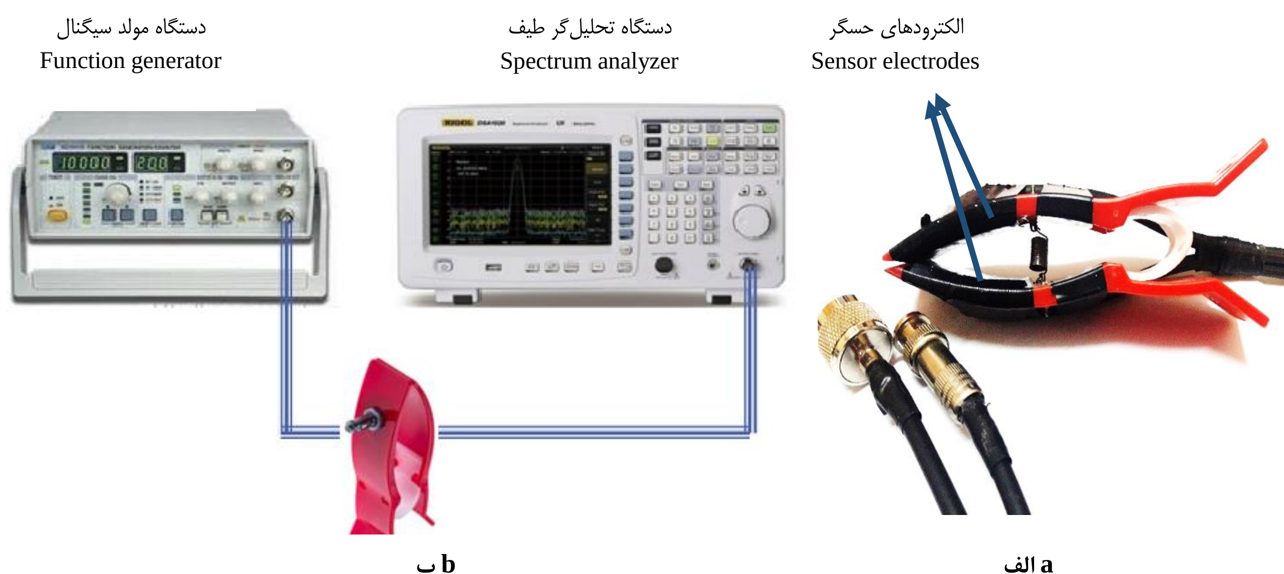
طیف‌سنجی دی‌الکتریک

به‌منظور اندازه‌گیری‌های دی‌الکتریک، پرابی به شکل یک انبر ساخته شد (شکل ۱-الف). این حسگر جهت امکان اندازه‌گیری سریع بر روی ساقه متشکل از دو الکترود نصب‌شده در دهانه انبر می‌باشد. الکترودهای خازن از ورق آلومینیوم مستطیل شکل با ابعاد ۲×۱/۵ سانتی‌متر در مقابل هم نصب شدند. فاصله دهانه انبر قابل‌تغییر و به شکل فنری برگشت‌پذیر می‌باشد به‌نحوی که می‌توان اندازه‌گیری بر روی ساقه‌ها با ضخامت‌های مختلف را اجرا نمود. الکترودهای خازن از طریق کابل کواکسیال با امپدانس مشخصه ۵۰ Ω از یک طرف به دستگاه مولد سیگنال (Ag-4151, Owon, Hong Kong) با دامنه فرکانسی ۱۵۰-۰ مگاهرتز و از طرف دیگر به دستگاه تحلیل‌گر طیف (GSP-827, GW Instek, Taiwan) متصل شد. شکل ۱- ب اجزا و نحوه اتصال در سامانه اندازه‌گیری را نشان می‌دهد. روش اندازه‌گیری مورداستفاده در این پژوهش طیف‌سنجی توان دی‌الکتریک نام‌گذاری شد که اساسا هدایت خازنی جریان الکتریکی از طریق ماده دی‌الکتریک را اندازه‌گیری می‌کند که تحت تاثیر تغییرات موجود در مشخصه‌های دی‌الکتریک ماده قرار می‌گیرد (Naderi-Boldaji *et al.*, 2015). استفاده از این روش با ترکیب مولد سیگنال و تحلیل‌گر طیف برای سنجش تغییر خصوصیات دی‌الکتریک مایعات با استفاده از یک حسگر تشدیدگر استوانه‌ای قبلا توسط هوگ و همکاران (Hoog *et al.*, 2012) گزارش شده است. مشخصات دی‌الکتریک یک ماده شامل ضریب دی‌الکتریک (ε') و فاکتور افت (ε'') می‌باشد که ضریب دی‌الکتریک بیانگر جذب انرژی میدان الکتریکی خارجی توسط دو قطبی‌های موجود در ماده با مکانیزم پلاریزاسیون و فاکتور افت بیانگر میزان تبدیل انرژی الکتریکی به حرارت در ماده می‌باشد. اندازه‌گیری مستقل مشخصه‌های دی‌الکتریک ماده نیازمند دستگاه‌های تحلیل‌گر برداری شبکه یا

1- Sensor fusion

تحلیل‌گر امپدانس می‌باشد که دستگاه‌های بسیار گران‌قیمت بوده و به‌سادگی در دسترس نمی‌باشند. لذا روش مورد استفاده در این مطالعه اثر خصوصیات دی‌الکتریک را با پارامتر توان دی‌الکتریک تابعی از فرکانس تغذیه به شکل طیف‌های توان در اختیار قرار می‌دهد. توانایی این روش در مطالعات متعدد قبلی مورد ارزیابی و تایید قرار گرفته است (Ghasemi-Varnamkhasti, Ghatreh-Samani, Naderi-Boldaji, Forina, & Bonyadian, 2017; Hoog *et al.*, 2012; Mireei *et al.*, 2016; Naderi-Boldaji *et al.*, 2018).

برای اندازه‌گیری نمونه‌ها، توان دی‌الکتریک در محدوده فرکانس بین ۰-۱۵۰ MHz اندازه‌گیری و با استفاده از نرم‌افزار الحاقی دستگاه تحلیل‌گر طیف ثبت شد. با توجه به عدم امکان جاروب فرکانس به شکل پیوسته، فرکانس‌ها به شکل دستی در ۸۹ فرکانس (با فاصله ۰/۵ MHz در محدوده ۰-۱۰ MHz و با فاصله ۲ بین ۱۰-۱۵۰ MHz) تنظیم شد و اندازه‌گیری توان در هر فرکانس جداگانه انجام شد.



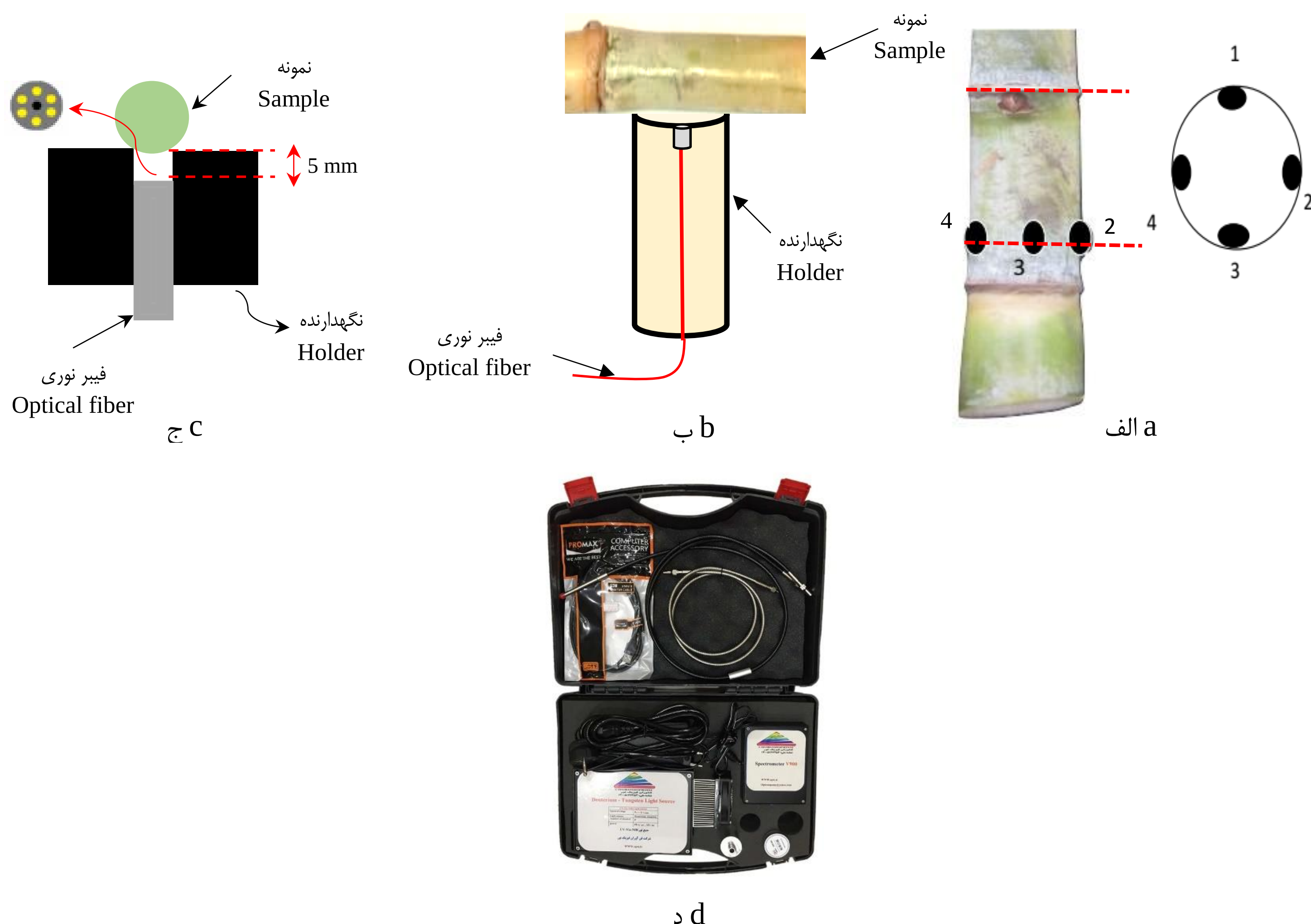
شکل ۱- الف) حسگر دی‌الکتریک و ب) سامانه اندازه‌گیری دی‌الکتریک و اجزای آن

Fig.1. a) The dielectric sensor and b) the dielectric measuring system and its components

طیف‌سنجی مرئی- فروسرخ نزدیک موج کوتاه (Vis-SWNIR)

جمع‌آوری طیف‌های Vis-SWNIR از نمونه‌ها به روش بازتابی پراکنشی[1] و با استفاده از دستگاه اسپکتروفوتومتر (مدل NIR-V900) ساخت شرکت فناوران فیزیک نور ایران انجام شد. این طیف‌سنج دارای آشکارساز CCD[2]، محدوده طیفی ۴۰۰ تا ۱۱۰۰ نانومتر و قابلیت تفکیک طول موج ۵ نانومتر است. همچنین این دستگاه مجهز به یک کاوشگر فیبر نوری شامل ۶ فیبر نوری ۲۰۰ میکرونی مجهز به درگاه خروجی SMA است به طوری‌که ۵ فیبر وظیفه انتقال نور از منبع نوری هالوژن به نمونه و یک فیبر وظیفه هدایت پرتوی برآمده از نمونه به دستگاه اسپکتروفوتومتر را انجام می‌دهد. نهایتا طیف به‌دست‌آمده از طریق درگاه USB به رایانه منتقل و ذخیره می‌شود. برای اندازه‌گیری نمونه‌های ساقه نیشکر، یک پایه تفلونی دارای سوراخی به قطر ۵ میلی‌متر در مرکز جهت عبور فیبر نوری ساخته شد (شکل ۲-ب). فاصله فیبر نوری از سطح پایه نگهدارنده نمونه در تمامی اندازه‌گیری‌ها ثابت (۵ میلی‌متر) بود به‌صورتی‌که فیبر با نمونه تماس مستقیم نداشت. با تنظیمات موجود در نرم‌افزار دستگاه، دستگاه در حالت بازتابی تنظیم شد و طیف‌های بازتابی بر حسب شدت نور ثبت شد. بر این اساس، از هر نمونه ساقه نیشکر ۴ طیف (از چهار نقطه محیطی، شکل ۲-الف) و با ۵ روبش متوالی (در هر نقطه) برداشت شد و میانگین آن‌ها به‌عنوان طیف اندازه‌گیری‌شده در نظر گرفته شد (شکل ۲).

1- Diffuse reflectance
2- Charge-Coupled Device



شکل ۲– الف) نقاط اندازه‌گیری روی ساقه و ب) طرحواره‌ی روش اندازه‌گیری طیف‌های *VIS/NIR*، ج) موقعیت فیبر نوری نسبت به نمونه‌ها و د) دستگاه طیف‌سنج مورد استفاده

Fig.2. a) The scanning points on the sugarcane stalk, b) Schematics of Vis-NIR measurement setup, c) The position of optical fiber with respect to the sample, and d) The device used for obtaining spectral data

اندازه‌گیری‌های مرجع

درجه بریکس معیاری جهت تعیین میزان مواد جامد محلول است که به‌طور استاندارد با روش شکست نور اندازه‌گیری می‌شود. در عصاره نیشکر این معیار به‌عنوان یکی از شاخص‌های عیار قند اندازه‌گیری و مقایسه می‌شود. برای اندازه‌گیری درجه بریکس، ابتدا عصاره هر نمونه ساقه نیشکر با فشار مکانیکی استخراج شد و سپس با استفاده از یک دستگاه رفرکتومتر دیجیتال رومیزی (Milwaukee MA871, Hungary) با دقت ۰/۲ g/100 ml، درجه بریکس نمونه‌ها با سه تکرار اندازه‌گیری و ثبت شد. برای تعیین محتوای رطوبت نمونه‌های ساقه نیشکر از روش خشک کردن با روش استاندارد (USDA, 1970) استفاده شد. ابتدا وزن تر نمونه‌ها با استفاده از ترازوی دیجیتال اندازه‌گیری شد. سپس نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در دستگاه آون با دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد قرار داده شد و وزن نمونه‌های خشک‌شده اندازه‌گیری شد. در نهایت محتوای رطوبت نمونه‌ها با استفاده از وزن تر و خشک محاسبه شد.

تحلیل داده‌ها

پیش‌پردازش داده‌ها

داده‌های خام طیف‌سنج Vis-SWNIR معمولا شامل اطلاعات غیرمفیدی است که در اثر عواملی مانند اثر پراکنش نور، ناهمواری‌های سطحی نمونه، تغییر در اندازه نمونه، نویز حرارتی آشکارساز طیف‌سنج ایجاد می‌شود. اطلاعات غیرمفید ممکن است تاثیر نامطلوب در نتایج حاصل از پردازش اطلاعات بگذارد. بنابراین به‌منظور حذف این اطلاعات باید قبل از تدوین مدل‌های کالیبراسیون، عملیات پیش‌پردازش بر روی داده‌ها انجام شود. برای پیش‌پردازش داده‌ها معمولا از روش‌های مختلف هموارسازی[1]، نرمال‌سازی[2] و افزایش قدرت تفکیک طیف[3] استفاده می‌شود (Heise & Winzen, 2006; Moomkesh *et al.*, 2017). در این پژوهش از روش‌های میانگین متحرک (MA)[4]، ساویتسکی-گولای (SG)[5]، تصحیح خط پایه (BC)[6]، تصحیح پراکنش افزاینده (MSC)[7]، متغیر نرمال استاندارد (SNV)[8]، مشتق اول (D1) و ترکیبی از این روش‌ها استفاده شد. MA و SG از روش‌های هموارسازی هستند که به‌منظور حذف نویزهای تصادفی استفاده می‌شوند. BC، MSC و SNV از روش‌های نرمال‌سازی هستند که برای تصحیح اثرات جمعی و افزاینده انحراف ناشی از عوامل فیزیکی مانند اندازه نمونه، پراکنش غیریکنواخت در طیف و ضریب شکست نور کاربرد دارند. از مشتق اول نیز برای افزایش قدرت تفکیکی طیف‌ها استفاده می‌شود که به این منظور ابتدا باید طیف‌ها هموار شوند. در این پژوهش از روش SG قبل از مشتق‌گیری استفاده شد (Jamshidi, Minaei, Mohajerani, & Ghassemian, 2014; Fu, Ying, Lu, Xu, & Yu, 2007).

تحلیل رگرسیون حداقل مربعات جزئی (PLS)[9]

روش PLS، یک روش مدل‌سازی خطی است که برای ساده‌سازی روابط میان متغیرهای مستقل (در اینجا داده‌های طیف‌های Vis/SWNIR و دی‌الکتریک) و متغیرهای وابسته (در اینجا بریکس و محتوای رطوبت)، مقادیر متغیرهای مستقل را به تعداد کمی از متغیرهای پنهانی (LV[10]) تصویر می‌کند. در واقع در این روش مولفه‌های جدید متعامدی که ترکیب خطی از متغیرهای اولیه هستند ایجاد شده، سپس از این مولفه‌ها برای ساختن مدل رگرسیونی استفاده می‌شود.

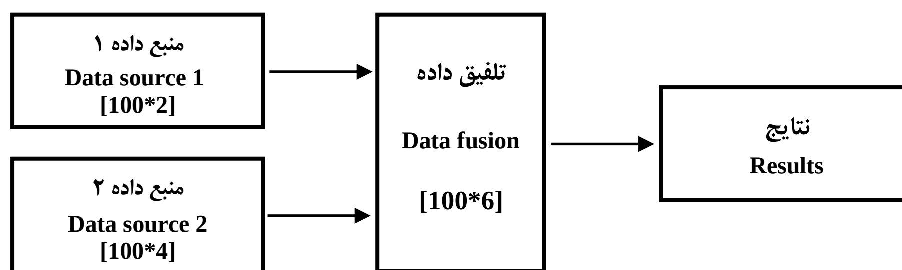
شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN)[11]

شبکه‌های عصبی مصنوعی مدل‌های ریاضی و انعطاف‌پذیری هستند که می‌توانند در مدل‌سازی سیستم‌های پیچیده و غیرخطی به‌کار برده شوند. این شبکه‌ها قادرند با انتخاب مناسب تعداد لایه‌ها و نرون‌ها، یک نگاشت غیرخطی بین ورودی‌ها و خروجی‌ها ارائه دهند. لایه یا لایه‌های مخفی، اطلاعات کسب‌شده از لایه ورودی را پردازش کرده و در اختیار لایه خروجی می‌دهد. در این تحقیق از دو نوع شبکه عصبی پرسپترون چندلایه (MLP) و شبکه آبشاری پس‌انتشار پیشرو (CFBP[12]) استفاده شد. شبکه عصبی CFBP نیز مانند MLP از الگوریتم پس‌انتشار خطا برای اصلاح وزن‌ها استفاده می‌کند ولی خصوصیت اصلی شبکه مذکور این است که نرون‌های هر لایه به همه نرون‌های لایه‌های قبل متصل است. برای آموزش و به‌هنگام‌سازی وزن‌های شبکه‌های مورد استفاده از روش‌های آموزش گرادیان نزولی (GD) و لونبرگ-مارکوارت (LM) استفاده شد. بهترین تابع فعال‌سازی، الگوریتم آموزشی و تعداد نرون به‌صورت سعی و خطا تعیین گردید.

روش‌های تلفیق داده[13]

تکنیک‌های تلفیق داده، ابزاری مهم است که می‌تواند عملکرد یک سیستم تشخیصی که از چندین حسگر مختلف تشکیل شده است را بهبود بخشد. در واقع در تلفیق داده، اطلاعات مربوط به پایگاه‌های داده چند حسگر (منابع مختلف اطلاعاتی) با یکدیگر تلفیق شده و نتایج بر اساس داده‌های جدید استخراج می‌شود (Luzuriaga, 1999). به‌طور کلی روش‌های تلفیق داده را می‌توان در سه سطح طبقه‌بندی کرد، تلفیق سطح پایین (LLF)[14]، سطح متوسط (ILF)[15] سطح بالا (HLF)[16] (Korel *et al.*, 2001). در تلفیق سطح پایین داده‌های همه منابع اطلاعاتی به‌سادگی پیش از ساخت مدل به هم اضافه می‌شوند (Castanedo, 2013; Rudnitskaya *et al.*, 2006). بنابراین در ماتریس داده ایجادشده با این روش، تعداد ردیف‌ها برابر با تعداد نمونه‌ها و تعداد ستون‌ها برابر با تعداد سیگنال‌های کلیه منابع است (شکل ۳).

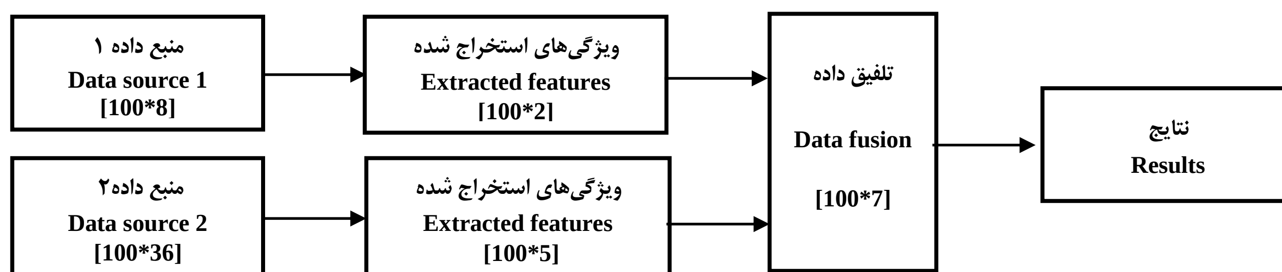
1- Smoothing
2- Normalizing
3- Spectral Resolution
4- Moving Average
5- Savitzky-Golay
6- Baseline Correction
7- Multiplicative Scatter Correction
8- Standard Normal Variate
9- Partial Least Squares
10- Latent variable
11- Artificial Neural Network
12- Cascade forward back propagation
13- Data Fusion
14- Low-Level fusion
15- Intermediate-Level Fusion
16- High-Level Fusion



شکل ۳– طرحواره بلوکی روش تلفیق داده سطح پایین (LLF)

Fig.3. Block diagram of the low level data fusion model (LLF)

در تلفیق داده سطح متوسط (ILF) که به‌عنوان تلفیق داده سطح ویژگی نیز معروف است، ابتدا برای هر منبع داده، استخراج ویژگی انجام می‌شود و سپس ترکیب ویژگی‌های استخراج‌شده در توسعه مدل استفاده می‌شود (شکل ۴). این روش با توجه به عملکرد مناسب و سازگاری کافی با روش‌های استخراج ویژگی، محبوبیت زیادی دارد (Borras *et al.*, 2015).



شکل ٤– طرحواره بلوکی روش تلفیق داده سطح متوسط (ILF)

Fig.4. Block diagram of the intermediate fusion model (ILF)

در تلفیق داده سطح بالا (HLF) داده‌های هر منبع تجزیه و تحلیل شده و پس از آن یک مدل برای هر منبع داده به‌طور جداگانه ساخته می‌شود. سپس نتایج حاصل از همه مدل‌ها ادغام می‌شوند (Biancolillo, Bucci, & Marini, 2014).

ارزیابی مدل‌های پیش‌بینی

در این پژوهش برای تدوین مدل‌های پیش‌بینی، ابتدا نمونه‌ها به دو دسته کالیبراسیون و پیش‌بینی به‌ترتیب شامل ۷۵٪ و ۲۵٪ داده‌ها تقسیم شدند. پس از آموزش مدل کالیبراسیون، از اعتبارسنجی متقاطع کامل[1] برای ارزیابی درونی مدل‌ها استفاده شد. این روش اعتبارسنجی، زمانی‌که تعداد نمونه‌ها کم یا متوسط است، مناسب‌ترین روش اعتبارسنجی مدل است (Jamshidi, Minaei, Mohajerani, & Ghassemian, 2012). در این روش پس از خارج کردن یک نمونه، مدل برای n-1 نمونه باقی‌مانده آموزش دیده و برای پیش‌بینی نمونه کنار گذاشته‌شده اعتبارسنجی می‌شود. با تکرار این الگوریتم برای تمامی نمونه‌ها اعتبارسنجی مدل کامل می‌شود. همچنین از دسته داده پیش‌بینی (۲۵٪ از کل داده‌ها) برای اعتبارسنجی نهایی مدل با نمونه‌هایی که قبلا در آموزش مدل به‌کارگرفته نشده استفاده شد. از پارامترهای آماری ریشه میانگین مربعات خطای کالیبراسیون ($RMSE_C$)، ریشه میانگین مربعات خطای اعتبارسنجی متقاطع یگانه ($RMSE_{CV}$)، ریشه میانگین مربعات خطای پیش‌گویی ($RMSE_P$) و همچنین ضریب تبیین کالیبراسیون (R^2_c)، ضریب تبیین اعتبارسنجی متقاطع یگانه (R^2_{cv}) و ضریب تبیین پیش‌گویی (R^2_p) برای مقایسه و اعتبارسنجی مدل‌ها استفاده شد. تحلیل‌های آماری این پژوهش با استفاده از نرم‌افزارهای SPSS v13، MATLAB 8.3 (R2014a) و Unscrambler x10.4 انجام شد.

نتایج و بحث

مشخصات نمونه‌ها و طیف‌های برداشت‌شده

جدول ۱ خلاصه‌ای از آمار توصیفی داده‌های کالیبراسیون و آزمون نمونه‌های نیشکر را نشان می‌دهد. مقادیر شاخص بریکس و

1- Leave One-out Cross Validation

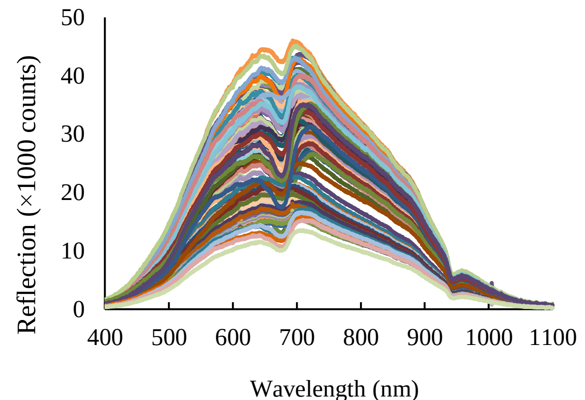
محتوای رطوبتی به‌ترتیب در محدوده ۷/۲۲-۵/۱۲ و ۸/۸۰-۶۵٪ برای دسته کالیبراسیون و ۴/۲۲-۳/۱۴ و ۸۱-۸/۶۹٪ برای دسته آزمون می‌باشند که بیانگر تنوع و دامنه تغییرات گسترده در نمونه‌ها می‌باشد. همچنین نزدیکی محدوده‌های بریکس، محتوای رطوبتی و قطر نمونه‌ها در دسته‌های کالیبراسیون و آزمون، قابل‌اعتماد بودن طبقه‌بندی تصادفی داده‌ها برای تحلیل را نشان می‌دهد.

جدول ۱- آمار توصیفی نمونه‌های نیشکر

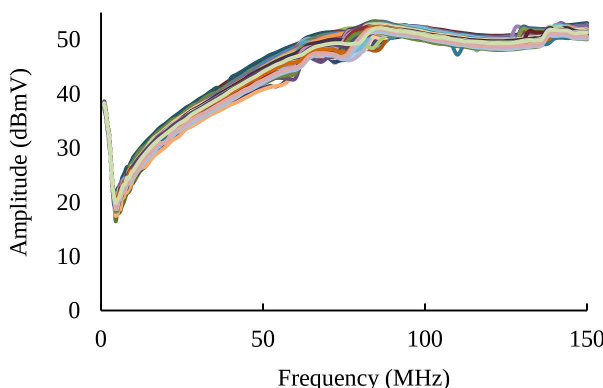
Table 1- Descriptive statistics of sugarcane stalk samples

مجموعه نمونه‌ها Sample set	نمونه‌های کالیبراسیون (۷۹ نمونه) Calibration (79 samples)				نمونه‌های آزمون (۲۸ نمونه) Prediction (28 samples)			
متغیر Variable	حداقل Min	حداکثر Max	میانگین Mean	انحراف استاندارد Standard deviation	حداقل Min	حداکثر Max	میانگین Mean	انحراف استاندارد Standard deviation
بریکس Brix (g/100 ml)	12.5	22.7	18.2	2.36	14.3	22.4	18.3	2.37
محتوای رطوبتی Moisture content (%)	65	80.8	74.1	2.87	69.8	81	73.8	3.11
قطر Diameter (mm)	16.6	30.8	22.3	2.91	16.9	28.7	22.1	2.87

شکل ۵ طیف‌های حاصل از دو روش Vis-SWNIR و دی‌الکتریک را برای تمامی نمونه‌ها نشان می‌دهد. در طیف‌های Vis-SWNIR با افزایش رطوبت میزان بازتاب به‌واسطه افزایش جذب کاهش یافته است چرا که مولکول آب در باند طیفی مورد مطالعه به‌خصوص در طول موج‌های بزرگ‌تر از ۶۰۰ نانومتر جذب قابل‌توجهی دارد (Langford, McKinley, & Quickenden, 2001). در طیف‌های دی‌الکتریک نیز روند موجود افزایش دامنه طیف‌ها با افزایش میزان رطوبت و کاهش آن با افزایش غلظت قند را نشان می‌دهد. افزایش میزان رطوبت در ساقه باعث افزایش ضریب دی‌الکتریک نمونه و متعاقبا افزایش توان دی‌الکتریک حسگر می‌شود (Skierucha *et al.*, 2012; Naderi-Boldaji *et al.*, 2015). بین رطوبت و غلظت قند در ساقه نیشکر معمولا یک همبستگی قوی منفی وجود دارد.



الف



ب

شکل ۵- الف) طیف‌های بازتابی Vis-SWNIR و ب) طیف‌های دی‌الکتریک نمونه‌های نیشکر

Fig.5. a) The reflection Vis-SWNIR spectra, and b) The dielectric spectra of the sugarcane samples

نتایج پیش‌بینی روش طیف‌سنجی Vis-SWNIR

نتایج کالیبراسیون و اعتبارسنجی درونی مدل‌های رگرسیونی PLS برای درجه بریکس و محتوای رطوبت با داده‌های طیفی Vis-SWNIR در جدول ۲ نشان داده شده است. مدل‌ها، هم بر اساس طیف‌های خام و هم با استفاده از روش‌های پیش‌پردازش مختلف بررسی شدند. مقایسه نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که مدل‌سازی شاخص بریکس با استفاده از پیش‌پردازش MSC بهترین نتیجه را به‌همراه داشته است (R^2_{cv}= ۰/۷۷، $RMSE_{CV}$= ۱/۱۳۶). برای

مدل‌سازی محتوای رطوبت، بهترین نتیجه در حالت استفاده از پیش‌پردازش SNV (R^2_{CV}= ۰/۷۳، $RMSE_{CV}$= ۱/۱۵) به‌دست‌آمد. همچنین در تدوین مدل‌ها به‌منظور جلوگیری از بیش یا کم‌برازش شدن مدل، انتخاب بهترین تعداد متغیر پنهانی (LV) بر اساس انتخاب نقطه کمینه در نمودار واریانس مقادیر باقی‌مانده در برابر تعداد متغیرهای پنهانی تعیین شد (Jamshidi *et al.*, 2012). به‌منظور صحت‌سنجی مدل‌های حاصل، بهترین مدل‌ها با ۲۵٪ از داده‌ها (داده‌های مشاهده‌نشده توسط مدل) مورد آزمون قرار گرفتند که نتایج آن در جدول ۳ گزارش شده است. همچنین شکل ۶ مقادیر پیش‌بینی‌شده مقدار رطوبت و بریکس مدل‌های PLS منتخب در مقابل مقادیر اندازه‌گیری‌شده آن‌ها نشان می‌دهد. بر این اساس خطای پیش‌بینی بریکس و محتوای رطوبت به‌ترتیب ۱/۱۲٪ و ۱/۴۹٪ حاصل شد که حاکی از دقت نسبتا خوب روش طیف‌سنجی Vis-SWNIR در اندازه‌گیری مشخصه‌های کیفی نیشکر می‌باشد.

این نتایج در مقایسه با برخی مطالعات دیگر با روش اندازه‌گیری مشابه در محصولات مختلف امیدوارکننده است. ناوی و همکاران (Nawi *et al.*, 2013) با مدل‌سازی PLS داده‌های حاصل از دو روش طیف‌سنجی جذبی و بازتابی در محدوده طیفی Vis-SWNIR به پیش‌بینی بریکس سه رقم مختلف نیشکر پرداختند و با R^2 و $RMSE_P$ به‌ترتیب ۰/۸۹ و ۱/۵۱ برای طیف جذبی و ۰/۹۱ و ۱/۴۱ برای طیف بازتابی مقادیر بریکس را پیش‌بینی نمودند. باقرپور و همکاران (Bagherpour, Minaei, Abdollahian Noghabi, & Khorasani Fardvani, 2015) در پژوهشی با استفاده از تکنیک NIR به بررسی میزان قند موجود در ریشه‌های چغندرقند پرداختند. نتایج تحلیل PLS برای تخمین بریکس، بیانگر R و $RMSE_P$ به‌ترتیب ۰/۹۵ و ۱/۷ بود. موم‌کش و همکاران (Moomkesh, Mireei, Sadeghi, & Nazeri, 2017) در اندازه‌گیری بریکس و محتوای رطوبت لیموشیرین با روش یکسان به‌ترتیب مقادیر خطای ۰/۵ و ۰/۵۷ را گزارش نمودند. پیرس و همکاران (Peirs, Lammertyn, Ooms, & Nicolaï, 2001) مقدار بریکس واریته‌های مختلف سیب را با استفاده از روش طیف‌سنجی فروسرخ نزدیک مورد بررسی قرار دادند. مدل‌های PLS تدوین‌شده مقادیر بریکس را با R^2 در محدوده ۰/۷۳—۰/۸۹ و خطای حدود ۰/۷ درجه بریکس پیش‌بینی نمودند.

جدول ۲- نتایج کالیبراسیون و اعتبارسنجی درونی مدل رگرسیون PLS برای پیش‌بینی بریکس و محتوای رطوبت نیشکر با داده‌های طیفی Vis-SWNIR

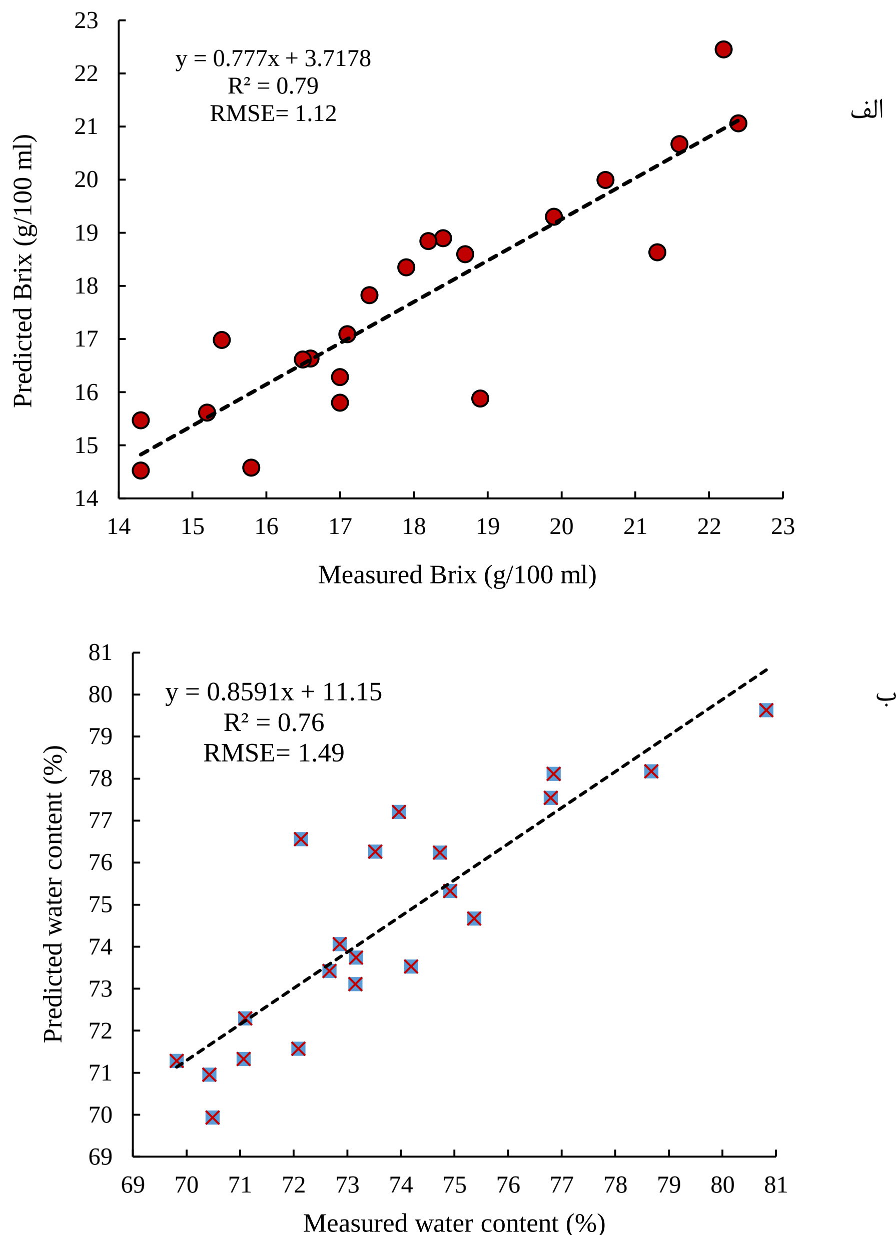
Table 2- The calibration and validation accuracy of PLS regression models for predicting Brix and moisture content in sugarcane using Vis-SWNIR spectral data

پیش‌پردازش Pre-processing	بریکس Brix: کالیبراسیون Calibration R^2_c	RMSEC	اعتبارسنجی متقاطع یگانه Leave-one-out cross validation R^2_{cv}	RMSECV	محتوای رطوبت Moisture content: کالیبراسیون Calibration R^2_c	RMSEC	اعتبارسنجی متقاطع یگانه Leave-one-out cross validation R^2_{cv}	RMSECV
Raw	0.91	0.677	0.75	1.173	0.94	0.675	0.70	1.575
BC	0.95	0.52	0.75	1.191	0.92	0.795	0.67	1.645
MA	0.91	0.693	0.73	1.228	0.89	0.942	0.67	1.643
MSC	**0.97**	**0.381**	**0.77**	**1.136**	0.96	0.579	0.71	1.568
SNV	0.96	0.579	0.71	1.568	**0.97**	**0.457**	**0.73**	**1.500**
SG	0.91	0.691	0.74	1.214	0.91	0.833	0.69	1.606
D1	0.94	0.731	0.73	1.231	0.94	0.693	0.69	1.607
MSC+SG+D1	0.96	0.459	0.74	1.196	0.92	0.812	0.68	1.628

جدول ۳- نتایج اعتبارسنجی بهترین مدل‌های PLS در پیش‌بینی مقدار بریکس و محتوای رطوبتی با داده‌های طیفی Vis-SWNIR

Table 3- The prediction accuracy of the top performing PLS models using Vis-SWNIR spectral data

متغیر Variable	پیش‌پردازش Pre-processing	R^2_p	RMSEP	LV
بریکس Brix (g/100 ml)	MSC	0.79	1.12	11
محتوای رطوبتی Moisture content (%)	SNV	0.76	1.49	12



شکل ٦– نتایج اعتبارسنجی مدل‌های PLS برای الف) مقدار بریکس و ب) محتوای رطوبتی با استفاده از داده‌های طیفی Vis-NIR

Fig.7. The validation results for PLS models of a) Brix, and b) Moisture content using the Vis-NIR spectral data

جدول ۴ نتایج ارزیابی دو نوع شبکه عصبی مصنوعی MLP و CFBP به‌منظور پیشگویی درصد محتوای رطوبت و بریکس نمونه‌ها را نشان می‌دهد. در پیش‌بینی بریکس، شبکه عصبی CFBP با ۲۰ نرون در لایه‌های مخفی کمترین مقدار خطا (۱/۳۸) و بالاترین ضریب تبیین (۰/۷۱) را به‌دست داد. همچنین شبکه عصبی MLP با ۱۷ نرون در لایه مخفی به‌عنوان بهترین شبکه در پیش‌بینی محتوای رطوبت با خطای ۱/۵۶ انتخاب شد. نتایج نشان می‌دهد که شبکه عصبی نتوانسته نتایج بهتری در مقایسه با روش رگرسیونی PLS ارائه دهد.

جدول ٤- نتایج اعتبارسنجی بهترین شبکه‌های عصبی در پیش‌بینی بریکس و محتوای رطوبتی با استفاده از داده‌های طیف‌سنجی Vis-SWNIR

Table 4- The validation results for the top performing neural networks in predicting Brix and water content using Vis-NIR spectral data

متغیر Variable	نوع شبکه Network type	الگوریتم آموزش Training algorithm	تابع فعالیت Function	تعداد نرون لایه مخفی The number of neurons in the hidden layer	RMSE	R^2
بریکس Brix (g/100 ml)	CFBP	LM	Logsig	20	1.38	0.71
محتوای رطوبتی Water content (%)	MLP	LM	Logsig	17	1.56	0.74

نتایج پیش‌بینی روش طیف‌سنجی دی‌الکتریک

به‌منظور حذف نویز از طیف‌های دی‌الکتریک از هموارسازی با استفاده از فیلتر ساویتزکی-گولای استفاده شد. نتایج مدل‌های به‌دست‌آمده با استفاده از روش رگرسیونی PLS با استفاده از طیف‌های دی‌الکتریک در جدول ۵ آورده شده است. دقت مدل به‌دست‌آمده در پیش‌بینی بریکس R^2_C= ۰/۷۴، RMSEC= ۱/۱۲، R^2_{cv}= ۰/۶۶، $RMSE_{CV}$= ۱/۳۲ و R^2_P= ۰/۵۹، $RMSE_P$= ۱/۸۴ و در پیش‌بینی محتوای رطوبتی R^2_C= ۰/۶۳، RMSEC= ۱/۷۵، R^2_{cv}= ۰/۵۳، $RMSE_{CV}$= ۲/۰۴ و R^2_P= ۰/۶۶، $RMSE_P$= ۱/۶۵ به‌دست‌آمد. دقت حسگر دی‌الکتریک توسعه داده‌شده در این مطالعه از نتایج Naderi-Boldaji *et al.*, (2015) که خطای $RMSE_P$= ۰/۳ برای اندازه‌گیری بریکس گزارش نمودند به‌مراتب کمتر است. این اختلاف می‌تواند به دلیل تفاوت در شکل پراب باشد که نیازمند بهینه‌سازی در مطالعات آینده می‌باشد.

جدول ۵- نتایج مدل‌های PLS در پیش‌بینی مقدار بریکس و محتوای رطوبتی با استفاده از طیف‌های دی‌الکتریک

Table 5- The accuracy of PLS models in predicting Brix and water content using dielectric spectra

متغیر Variable	R^2_c	RMSEC	R^2_{cv}	RMSECV	R^2_p	RMSEP	LV
بریکس Brix (g/100 ml)	0.74	1.13	0.66	1.32	0.59	1.84	10
محتوای رطوبتی Water content (%)	0.63	1.75	0.53	2.04	0.66	1.65	10

نتایج شبکه‌های عصبی در مدل‌سازی داده‌های حسگر دی‌الکتریک به‌منظور پیش‌بینی درصد محتوای رطوبت و بریکس ساقه‌های نیشکر در جدول ۶ گزارش شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود شبکه عصبی CFBP با الگوریتم آموزش لونبرگ-مارکوارت و تابع فعال‌ساز لگاریتمی، در بین سایر شبکه‌های عصبی و الگوریتم‌های آموزشی، بهترین نتایج را در پیش‌بینی هر دو پارامتر دارا می‌باشد هرچند به‌طور کلی از دقت بالایی نسبت به روش رگرسیون PLS برخوردار نمی‌باشند.

جدول ٦- نتایج اعتبارسنجی بهترین شبکه‌های عصبی در پیش‌بینی بریکس و محتوای رطوبتی با استفاده از طیف‌های دی‌الکتریک

Table 6- The validation results for the top performing neural networks in predicting Brix and water content using dielectric spectra

متغیر Variable	نوع شبکه Network type	الگوریتم آموزش Training algorithm	تابع فعالیت Function	تعداد نرون لایه مخفی The number of neurons in the hidden layer	RMSE	R^2
بریکس (g/100 ml) Brix (g/100 ml)	CFBP	LM	Logsig	18	2.09	0.51
محتوای رطوبتی (٪) Water content (%)	CFBP	LM	Logsig	21	1.86	0.56

تلفیق داده‌ها

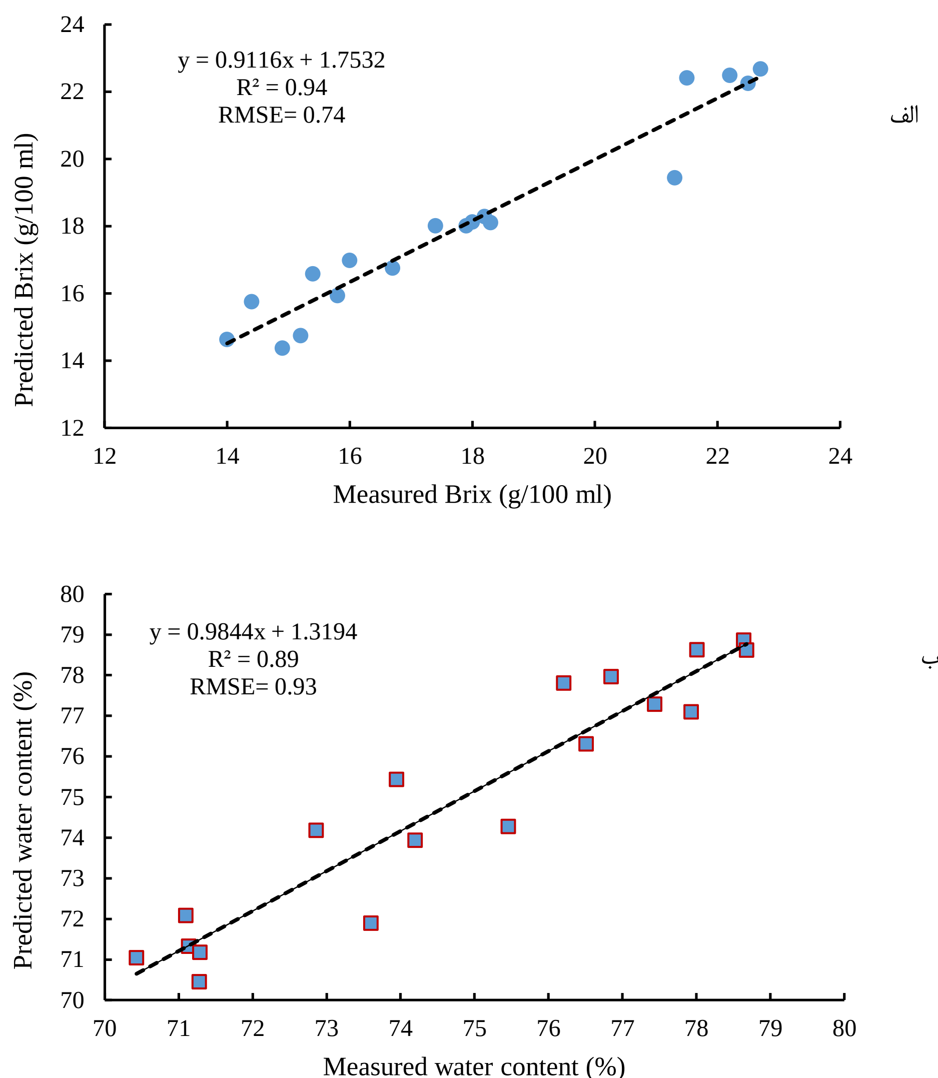
در این مطالعه قابلیت دو روش تلفیق داده سطح پایین و سطح متوسط در پیش‌بینی مقادیر بریکس و محتوای رطوبت نمونه‌های نیشکر مورد بررسی قرار گرفت. در تلفیق داده سطح پایین، داده‌های به‌دست‌آمده از روش NIR و دی‌الکتریک پس از پیش‌پردازش، در یک ماتریس واحد با روش رگرسیون PLS تحلیل شد. با توجه به این‌که در تحلیل داده‌های NIR دو روش پیش‌پردازش MSC و SNV به‌ترتیب در پیش‌بینی بریکس و محتوای رطوبت بهترین نتایج را نشان دادند، در این قسمت نیز از داده‌های پیش‌پردازش‌شده با این دو روش استفاده شد. نتایج مدل‌های حاصل از تلفیق داده‌ها در سطح پایین در جدول ۷ نشان داده شده است. دقت مدل‌ها برای پیش‌بینی بریکس R^2_c= ۰/۷۹، $RMSE_C$= ۱/۰۷، R^2_{cv}= ۰/۶۵، $RMSE_{CV}$= ۱/۴، R^2_P= ۰/۶۵، $RMSE_P$= ۱/۳۷ و برای پیش‌بینی محتوای رطوبت R^2_c= ۰/۶۹، $RMSE_C$= ۱/۵۸، R^2_{cv}= ۰/۵۲، $RMSE_{cv}$= ۲/۰۱، R^2_P= ۰/۵۳، $RMSE_P$= ۲/۰۱ به‌دست آمد. این نتایج نشان می‌دهد که دقت مدل‌های PLS به‌دست‌آمده از تلفیق داده سطح پایین نسبت به مدل‌های مشابه در تحلیل‌های جداگانه برای روش‌های NIR و دی‌الکتریک کاهش پیدا کرده است. در ادامه به‌منظور انجام تلفیق داده سطح متوسط از متغیرهای پنهانی مدل‌های PLS منتخب به‌عنوان ورودی مدل استفاد شد. نتایج به‌دست‌آمده حاکی از بهبود قابل‌توجه دقت مدل‌های PLS حاصل در پیش‌بینی مقدار بریکس و محتوای رطوبت می‌باشد. همان‌طور که در جدول ۷ مشاهده می‌شود دقت این روش در پیش‌بینی بریکس R^2_C= ۰/۹۵، $RMSE_C$= ۰/۹۲، R^2_C= ۰/۹۲، $RMSE_C$= ۰/۶۶ و در پیش‌بینی محتوای رطوبت R^2_C=۰/۸۸، $RMSE_C$= ۱/۰۰، R^2_C= ۰/۷۷، $RMSE_C$= ۱/۱۷، حاصل شد. همچنین نتایج صحت‌سنجی مدل‌های مذکور موید دقت بسیار مطلوب‌تر مدل‌های به‌دست‌آمده نسبت به روش تلفیق سطح پایین می‌باشد طوری‌که برای مدل توصیف‌کننده بریکس مقادیر R^2_P= ۰/۹۴، $RMSE_P$= ۰/۷۴ و برای محتوای رطوبت R^2_P= ۰/۸۹، $RMSE_P$= ۰/۹۳ حاصل شد. مقادیر پیش‌بینی‌شده بریکس و رطوبت در مقابل مقادیر اندازه‌گیری‌شده به‌دست‌آمده با استفاده از روش تلفیق داده سطح متوسط در شکل ۷ نشان داده شده است.

دقت حاصل با مدل‌های تلفیق داده برای پیش‌بینی بریکس در مقایسه با مطالعات انجام‌شده صرفا با روش NIR نتیجه مطلوبی است. با این‌حال برخی منابع خطا در اندازه‌گیری بریکس مرجع می‌تواند عامل کاهش دقت باشد. برای مثال در روش استاندارد آزمایشگاهی برای اندازه‌گیری بریکس از استات سرب برای شفافیت نمونه قبل از اندازه‌گیری با رفرکتومتر استفاده می‌شود در حالی‌که در مطالعه حاضر عصاره استخراج‌شده فقط با کاغذ صافی و بدون استفاده از هرگونه ماده شیمیایی تهیه شد.

جدول ۷- نتایج مدل‌های PLS در پیش‌بینی مقدار بریکس و محتوای رطوبتی بر مبنای روش‌های تلفیق داده

Table 7- Brix and water content prediction accuracy using PLS models with data fusion methods

متغیر **Variable**	سطح تلفیق داده **Data fusion level**	R^2_c	$RMSE_C$	R^2_{cv}	$RMSE_{CV}$	R^2_P	$RMSE_P$	LV
بریکس Brix	پایین Low	0.79	1.07	0.65	1.4	0.65	1.27	6
بریکس Brix	**متوسط Intermediate**	**0.95**	**0.92**	**0.92**	**0.66**	**0.94**	**0.74**	**5**
محتوای رطوبت Water content	پایین Low	0.69	1.58	0.52	2.01	0.53	2.01	5
محتوای رطوبت Water content	**متوسط Intermediate**	**0.88**	**1**	**0.77**	**1.17**	**0.89**	**0.93**	**4**



شکل ۷- نتایج اعتبارسنجی مدل‌های PLS تلفیق داده سطح متوسط الف) مقدار بریکس، ب) محتوای رطوبتی

Fig.7. The validation results for PLS models with intermediate fusion level in predicting a) Brix and b) Water content

نتیجه‌گیری

در این مطالعه روش‌های طیف‌سنجی دی‌الکتریک و طیف‌سنجی بازتابی Vis-SWNIR برای اندازه‌گیری غیرمخرب مشخصه‌های کیفی نیشکر شامل غلظت قند (Brix) و محتوای رطوبت ساقه نیشکر مورد ارزیابی قرار گرفت. به‌منظور ایجاد مدل‌های توصیف‌کننده ویژگی‌های کیفی، روش‌های تحلیلی رگرسیونی PLS و شبکه عصبی مصنوعی مقایسه شد. در ابتدا مدل‌های پیش‌بینی با استفاده مستقیم و جداگانه از داده‌های حاصل از هرکدام از روش‌های طیف‌سنجی دی‌الکتریک و طیف‌سنجی Vis-SWNIR مورد بررسی قرار گرفت و سپس توانایی روش‌های تلفیق داده در افزایش کارایی مدل‌های توصیف‌کننده بررسی شد. بهترین نتیجه برای هرکدام از روش‌های اندازه‌گیری دی‌الکتریک و طیف‌سنجی Vis-SWNIR خطای اندازه‌گیری بریکس به‌ترتیب ۱/۱۳۶ و ۱/۸۸ را ارائه داد که نشان‌دهنده دقت مطلوب‌تر روش Vis-SWNIR می‌باشد. با تلفیق دو روش در سطح متوسط، خطای اندازه‌گیری بریکس به ۰/۷۴ کاهش یافت که در مقایسه با نتایج دیگر مطالعات بهبود قابل‌توجهی است. براساس نتایج به‌دست‌آمده، سامانه اندازه‌گیری براساس تلفیق روش‌های طیف‌سنجی دی‌الکتریک و طیف‌سنجی Vis-SWNIR توانایی اندازه‌گیری مقادیر بریکس و محتوای رطوبت ساقه نیشکر را

دارد. با توجه به اهمیت اندازه‌گیری خصوصیات کیفی نیشکر در طول مراحل رشد و داشت آن، این تحقیق می‌تواند در توسعه یک حسگر ترکیبی قابل‌حمل به‌منظور تشخیص سریع و غیرمخرب پارامترهای کیفی این محصول نقش به‌سزایی داشته باشد.

سپاسگزاری

این مقاله مستخرج از نتایج طرح تحقیقاتی اجرا شده به شماره گرنت 0GRD34M1614 از محل اعتبارات معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه شهرکرد می‌باشد. از حمایت مالی دانشگاه شهرکرد برای اجرای این طرح قدردانی می‌گردد. همچنین از پشتیبانی شرکت کشت و صنعت نیشکر امیرکبیر خوزستان برای تهیه و ارسال نمونه‌های نیشکر قدردانی می‌گردد.

مشارکت نویسندگان

مجتبی نادری بلداجی: نظارت و مدیریت، مفهوم‌سازی، روش‌شناسی، اعتبارسنجی، ویرایش متن

مجتبی توحیدی: جمع‌آوری داده‌ها، پردازش داده‌ها، تحلیل آماری، استخراج و تهیه متن اولیه

مهدی قاسمی ورنامخواستی: مشاوره فنی، مفهوم‌سازی، ویرایش متن

References

1. Aldeza, C. G., Botella, M., Toldr, P., & Fito, P. (2010). Low frequency dielectric spectrum to determine pork meat quality. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, *11*(2), 376-386. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2010.01.011
2. Anonymous. (2018). Agriculture– Iran– Statistics: *Agriculture Agricultural census*. *2016-2017*, *1*, 47-48. (in Persian).
3. Augusto, P., & Filho, C. (2009). Rapid determination of sucrose in chocolate mass using near infrared spectroscopy. *Analytica Chimica Acta*, *631*, 206-211. https://doi.org/10.1016/J.ACA.2008.10.049
4. Bahrami, M. E., Honarvar, M., Ansari, K., & Jamshidi, B. (2020). Measurement of quality parameters of sugarbeet juices using near-infrared spectroscopy and chemometrics. *Journal of Food Engineering*, *271*, 109775. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.109775
5. Bagherpour, H., Minaei, H., Abdollahian Noghabi, M., & Khorasani Fardvani, M. E. (2015). Non-destructive determination of sugar content in root beet by near infrared spectroscopy (NIRS). *Food Science and Technology*, *46*(12), 219-228. (in Persian with English abstract).
6. Biancolillo, A., Bucci, R., & Marini, F. (2014). Data-fusion for multiplatform characterization of an Italian craft beer aimed at its authentication. *Analytica Chimica Acta*, *820*, 23-31. https://doi.org/10.1016/j.aca.2014.02.024
7. Blakey, R. T., & Morales-Partera, A. M. (2016). Microwave dielectric spectroscopy– A versatile methodology for online, non-destructive food analysis, monitoring and process control. *Engineering in Agriculture, Environment and Food*, *9*(3), 264-273. https://doi.org/10.1016/j.eaef.2016.02.001
8. Bobelyn, E., Serban, A. S., Nicu, M., Lammertyn, J., Nicoli, B. M., & Saeys, W. (2010). Postharvest quality predicted by NIR-spectroscopy: Study of the effect of biological variability on spectra and model performance. *Postharvest Biology and Technology*, *55*(3), 133-143. https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2009.09.006
9. Borras, E., Ferre, J., Boque, R., Mestres, M., Acena, L., & Busto, O. (2015). Data fusion methodologies for food and beverage authentication and quality assessment–A Review. *Analytica Chimica Acta*, *891*(3), 1-14. https://doi.org/10.1016/j.aca.2015.04.042
10. Castanedo, F. (2013). *A Review of Data Fusion Techniques*. Hindawi Publishing Corporation, 2013, 1-19.
11. Chiatrakul, J., Terdwongworakul, A., Phuangsombut, K., & Phuangsombut, A. (2022). Improved evaluation of commercial cane sugar content in sugarcane stalk using near infrared hyperspectral imaging and stalk axis rotation technique. *Biosystems Engineering*, *223*, 161-173. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2022.08.019
12. Choi, J. H., Chen, P. A., Lee, B., & Yim, S. H. (2017). Portable, non-destructive tester integrating VIS/NIR reflectance spectroscopy for the detection of sugar content in Asian pears. *Scientia Horticulturae*, *220*(16), 147-153. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2017.03.050
13. Cole, M. R., Eggleston, G., Gilbert, A., & Chung, Y. J. (2016). Development of an analytical method to measure insoluble and soluble starch in sugarcane and sweet sorghum products. *Food Chemistry*, *190*, 50-59. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.05.049
14. FAO. (2021). Food and Agricultural Organization of United Nations. Statistical Yearbook 2021. Rome. https://doi.org/10.4060,cb4477en
15. Fazayeli, A., Kamgar, S., Nassiri, S. M., Fazayeli, H., & Guardia, M. D. L. (2019). Dielectric spectroscopy as a potential technique for prediction of kiwifruit quality indices during storage. *Information Processing in Agriculture*, *6*(4), 479-486. https://doi.org/10.1016/j.inpa.2019.02.002
16. Fu, X., Ying, Y., Lu, H., Xu, H., & Yu, H. (2007). FT-NIR diffuse reflectance spectroscopy for kiwifruit firmness detection. *Sensing and Instrumentation for Food Quality and Safety*, *1*, 29-35. https://doi.org/10.1007/s11694-007-

9004-2

17. Gaci, B., Garcia, S. M., Abdelghafour, F., Adrian, J., Maupas, F., & Roger, J. M. (2022). Assessing the potential of a handheld visible-near infrared microspectrometer for sugar beet phenotyping. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, *30*(3), 122-129. https://doi.org/10.1177/09670335221083448
18. Garcia, A., Torres, J. L., De Blas, M., De Francisco, A., & Illanes, R. (2004). Dielectric characteristics of grape juice and wine. *Journal of Biosystems Engineering*, *88*(3), 343-349. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2004.04.008
19. Ghasemi-Varnamkhasti, M., Ghatreh-Samani, N., Naderi-Boldaji, M., Forina, M., & Bonyadian, M. (2017). Development of two dielectric sensors coupled with computational techniques for detecting milk adulteration. *Computers and Electronics in Agriculture*, *140*, 266-278. https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.06.005
20. Goodarzi, N., Movahhed, S., Shakouri, M. J., & Ahmadi Chenarbon, H. (2022). Feasibility of Visible/Near Infrared (Vis/NIR) Spectroscopy capability in classification of lemon samples during storage period by PCA, LDA and SVM identification methods. *Iranian Journal of Food Science and Technology*, *18*, 335-352. https://doi.org/10.52547/fsct.18.120.26
21. Guo, W., Nelson, S. O., Trabelsi, S., & Kays, S. J. (2007). Dielectric properties of honeydew melons & correlation with quality. *Microwave Power & Electromagnetic Energy*, *41*(2), 4454. https://doi.org/10.1080/08327823.2006.11688556
22. Guo, W., Zhu, X., Liu, Y., & Zhuang, H. (2010). Sugar and water contents of honey with dielectric property sensing. *Journal of Food Engineering*, *97*(2), 275-281. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2009.10.024
23. Heise, H. M., & Winzen, R. (2006). *Chemometrics in Near-Infrared Spectroscopy*. In: Siesler, H. W., Ozaki, Y., Kawata, S. and Heise, H. M. (Eds.) Near-Infrared Spectroscopy: Principles, Instruments, Applications. 3rd Reprint. WileyVCH. Germany.
24. Hoog, N. A., Olthuis, W., Mayer, M. J. J., Yntema, D., Miedema, H., & van den Berg, A. (2012). Online fingerprinting of fluids using coaxial stub resonator technology. *Sensors and Actuators, B: Chemical*, *163*(1), 90-96. https://doi.org/10.1016/j.snb.2012.01.012
25. Jamshidi, B., Minaei, S., Mohajerani, E., & Ghassemian, H. (2012). Reflectance Vis/NIR spectroscopy for nondestructive taste characterization of Valencia oranges. *Computers and Electronics in Agriculture*, *85*, 64-69. https://doi.org/10.1016/j.compag.2012.03.008
26. Jamshidi, B., Minaei, S., Mohajerani, E., & Ghassemian, H. (2014). Effect of spectral pre-processing methods on non-destructive quality assessment of oranges using NIRS. *Journal of Agricultural Engineering Research*, *167*, 264-271. (in Persian with English abstract). https://doi.org/10.22092/JAER.2014.100188
27. Korel, F., Luzuriaga, D., & Balaban, M. O. (2001). Objective quality assessment of raw tilapia (*Oreochromis niloticus*) fillets using electronic nose and machine vision. *Journal of Food Science*, *66*(7), 1018-1024.
28. Lal Mathur, R. B. (1990). *Handbook of cane sugar technology*. Oxford & Ibh Publishing Co. India. pp:11.
29. Langford, V. S., McKinley, A. J., & Quickenden, T. I. (2001). Temperature Dependence of the Visible-Near-Infrared Absorption Spectrum of Liquid Water. *Journal of Physical Chemistry A*, *105*, 8916-8921. https://doi.org/10.1021/jp010093m
30. Luzuriaga, D. A. (1999). Application of computer vision and electronic nose technologies for quality assessment of color and odor of shrimp and salmon. *PhD dissertation, Department of Food Science and Technology*, University of Florida, Gainesville, FL.
31. Magalhaes, P. S. G., & Cerri, D. G. P. (2007). Yield monitoring of sugar cane. *Biosystems Engineering*, *96*(1), 1-6. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2006.10.002
32. Magwaza, L. S., Opara, U. L., Terry, L. A., Landahl, S., Cronje, P. J. R., Nieuwoudt, H. H., Hanssens, A., Saeys, W., & Nicolaï, B. M. (2013). Evaluation of Fourier transform-NIR spectroscopy for integrated external and internal quality assessment of Valencia oranges. *Journal of Food Composition and Analysis*, *31*(1), 144-154. https://doi.org/10.1016/j.jfca.2013.05.007
33. Mehrotra, R., & Siesler, H. W. (2003). Application of mid infrared/near infrared spectroscopy in sugar industry. *Applied Spectroscopy Reviews*, *38*(3), 307-354. https://doi.org/10.1081/ASR-120024392
34. Mireei, S. A., Mohtasebi, S. S., Masoodi, R., Rafiei, S. H., & Arabanian, A. S. (2010). Application of FT-NIR spectroscopy in nondestructive maturity determination of Shahani date fruit. *Iranian Journal of Biosystem Engineering*, *41*(2), 113-120. (in Persian with English abstract).
35. Mireei, A., Bagheri, R., Sadeghi, M., & Shahraki, A. (2016). Developing an electronic portable device based on dielectric power spectroscopy for non-destructive prediction of date moisture content. *Sensors and Actuators A: Physical*, *247*, 289-297. https://doi.org/10.1016/j.sna.2016.06.012
36. Moomkesh, S., Mireei, S. A., Sadeghi, M., & Nazeri, M. (2017). Non-destructive prediction of quality parameters of sweet lemon (*Citrus limetta*) by Vis-SWNIR spectroscopy. *Iranian Journal of Biosystems Engineering*, *47*(4), 603-613. (in Persian with English abstract). https://doi.org/10.22059/IJBSE.2017.61991
37. Naderi-Boldaji, M., Fazelian-Dehkordi, M., Mireei, A., & Ghasemi-Varnamkhasti, M. (2015). Dielectric power spectroscopy as a potential technique for the non-destructive measurement of sugar concentration in sugarcane.

Journal of Biosystems Engineering, *140*, 1-10. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2015.09.003

38. Naderi-Boldaji, M., Mishra, P., Ahmadpour-Samani, M., Ghasemi-Varnamkhasti, M., Ghanbarian, D., & Izadi, Z. (2018). Potential of two dielectric spectroscopy techniques and chemometric analyses for detection of adulteration in grape syrup. *Measurement*, *127*, 518-524. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.06.015
39. Nawi, M. N., Chen, G., Jensen, T., & Mehdizadeh, S. A. (2013). Prediction and classification of sugar content of sugarcane based on skin scanning using visible and shortwave near infrared. *Biosystems Engineering*, *115*(2), 151-161. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2013.03.005
40. Nawi, N. M., Jensen, T., & Chen, G. (2012). The application of spectroscopic methods to predict sugarcane quality based on stalk cross-sectional scanning. *Journal of American Society of Sugar Cane Technologists*, *32*, 16-27.
41. Nelson, S. O. (2004). Agricultural applications of dielectric spectroscopy. *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, *39*(2), 75-85. https://doi.org/10.1080/08327823.2004.11688510
42. Pan, L., Zhu, Q., Lu, R., & McGrath, J. M. (2015). Determination of sucrose content in sugar beet by portable visible and near-infrared spectroscopy. *Journal of Agriculture and Food Chemistry*, *167*(15), 264-271. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.06.117
43. Pandiselvam, R., Prithviraj, V., Manikantan, M. R., Kothakota, A., Rusu, A. V., Trif, M., & Khaneghah, A. M. (2022). Recent advancements in NIR spectroscopy for assessing the quality and safety of horticultural products: A comprehensive review. *Frontiers in Nutrition*, *9*, 973457. https://doi.org/10.3389/fnut.2022.973457
44. Peirs, A., Lam mertyn, J., Ooms, K., & Nicolaı, B. M. (2001). Prediction of the optimal picking date of different apple cultivars by means of VIS: NIR-spectroscopy. *Postharvest Biology and Technology*, *21*(2), 189-199. https://doi.org/10.1016/S0925-5214(00)00145-9
45. Rudnitskaya, A., Kirsanov, D., Legin, A., Beullens, K., Lammertyn, J., & Nicolaï, B. M. (2006). Analysis of apples varieties– Comparison of electronic tongue with different analytical techniques. *Sensors and Actuators B: Chemical*, *116*(1-2), 23-28. https://doi.org/10.1016/j.snb.2005.11.069
46. Sanaeifar, A., Jafari, A., & Golmakani, M. T. (2018). Fusion of dielectric spectroscopy and computer vision for quality characterization of olive oil during storage. *Computers and Electronics in Agriculture*, *145*, 142-152. https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.12.035
47. Sirisomboon, P. (2018). NIR spectroscopy for quality evaluation of fruits and vegetables. *Materials Today: Proceedings*, *5*(10), 22481-22486. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.06.619
48. Skierucha, W., Wilczek, A., & Szypowska, A. (2012). Dielectric spectroscopy in agrophysics. *International Agrophysics*, *26*, 187-197. https://doi.org/10.2478/v10247-012-0027-5
49. Soltani, M., Alimardani, R., & Omid, M. (2011). Evaluating banana ripening status from measuring dielectric properties. *Journal of Food Engineering*, *105*(4), 625-631. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.03.032
50. Xiaobo, Z., Jiewen, Z., Xingyi, H., & Yanxiao, L. (2007). Use of FT-NIR spectrometry in non-invasive measurements of soluble solid contents (SSC) of 'Fuji' apple based on different PLS models. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, *87*(1), 43-51. https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2006.09.003